

برآورد بارکف یک رودخانه با بستر شنی با استفاده از سیستم‌های تکاملی و روش‌های کلاسیک (مطالعه موردی رودخانه قطور)

کیومرث روشنگر^{۱*}، داریوش حکیمی^۲

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۲/۲۴ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۹/۰۲

^۱ دانشیار دانشکده عمران، دانشگاه تبریز

^۲ کارشناس ارشد مهندسی عمران سازه‌های هیدرولیکی شرکت سهامی آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: roshangari@tabrizu.ac.ir

چکیده

برای جلوگیری و یا به کمینه رساندن خسارت‌های وارده ناشی از فرآیند فرسایش و انتقال تاکنون روش‌های کلاسیک ریاضی متعددی جهت پیش‌بینی انتقال رسوب ارائه شده است. این روش‌ها به‌طور عمده بر مبنای فرضیات و روش‌های آماری و داده‌های میدانی یا آزمایشگاهی استوارند که توسط محققان متعددی نظیر یانگ، وایت، بگنولد، هانسن پیشنهاد شده است. نتایج حاصل از روش‌های کلاسیک در برآورد میزان رسوب عموماً حاکی از عملکرد نامناسب این روش‌ها در شرایط هیدرولیکی متفاوت و حساسیت بالا به شرایط رودخانه و اندازه مواد بستر است. در این مقاله از عملکرد سیستم‌های تکاملی جهت برآورد بارکف رودخانه با بستر شنی قطورچای که در استان آذربایجان غربی و در محدوده شهرستان خوی واقع گردیده با استفاده از نمونه‌برداری‌های انجام شده در ایستگاه پل یزدکان استفاده شده است. بدین‌منظور با استفاده از روش برنامه‌ریزی ژنتیک، پارامترهای ورودی مورد نیاز برای مدل‌سازی، با توجه به پارامترهای حاکم روش‌های کلاسیک و همچنین مفهوم پایه‌ای به‌کار رفته در ساختار این روش‌ها، انتخاب و بهینه شده است. سپس تحلیل‌های لازم انجام شد. در مراحل مختلف مدل‌سازی، ضمن بررسی اثرات عوامل مؤثر در کارایی سیستم تکاملی، ساختارهای بهینه برای هر یک از این مدل‌ها تعیین و نتایج حاصل، با روش‌های کلاسیک مقایسه شده است. نتایج حاصل نشان داد که استفاده از سیستم‌های تکاملی هوشمند توانایی بالائی در پیش‌بینی برآورد بارکف رودخانه با بستر شنی قطورچای نسبت به دیگر روش‌های کلاسیک دارد.

واژه‌های کلیدی: بار کف، داده‌های میدانی، روش‌های کلاسیک، سیستم‌های تکاملی

Estimation of Bed Load Rate of a Gravel Bed River Using Evolutionary Systems and Classic Methods

K Roushangar^{*1}, D Hakimi²

Received: 14 May 2015

Accepted: 22 November 2016

¹ Assoc.Prof. Dept. of Civil Eng., University of Tabriz, Iran

² Master of Civil Engineering Hydraulic Structure, East Azarbaijan Regional Water Company, Iran

* Corresponding Author, E-mail: roshangari@tabrizu.ac.ir

Abstract

Many mathematical classic methods have been suggested for predicting sediment transport in order to prevent or minimize damages caused by the erosion and sedimentation. These methods are mainly based on some statistical methods and field - laboratory data which have been suggested by many researchers such as Yang, White, Bagnold, and Hansen. The results obtained from the classical methods for predicting sediment transport revealed poor performance of these methods under different hydraulic conditions and the high sensitivity of them to river conditions and bed particle size. In this paper, performance of evolutionary systems for predicting the bed load transport in a gravel bed river was evaluated. For this purpose, the genetic programming method was used and the inputs parameters required for modeling were selected and optimized according to the parameters governing the classical methods as well as the basic concepts used in the structure of these methods. The data used herein was obtained from sampling Yazdekan Bridge station of Ghotourchay River which is located in West Azarbaijan and within the city limits of Khoy. In different stages of modeling, effect of different factors on performance of evolutionary systems was investigated and the optimized structure for each of these models was determined. Next, the results were compared with the classical methods. The obtained results showed high capability of intelligent methods comparing to other classic formulas for predicting the bed load in a gravel bed river

Keywords: Bed load, Classic methods, Evolutionary systems, Field data

مقدمه

عبور جریان رودخانه ایجاد می‌کند که عبارتند از: ۱- ایجاد جزایر آبرفتی در مسیر رودخانه و در نتیجه کاهش ظرفیت انتقال جریان ۲- رسوب‌گذاری در کف کانال و در نتیجه کاهش عمق رودخانه و ممانعت از کشتیرانی ۳- کاهش عمق مفید جریان و افزایش سطح آزاد آب و در نتیجه افزایش تبخیر آب و ایجاد باتلاق‌های شور ۴- کاهش مواد آلی مصرفی در زنجیره غذایی آبزیان و در نتیجه کاهش جمعیت ماهی‌ها و سایر آبزیان ۵- رسوب‌گذاری در مخازن پشت سدها و در نتیجه کاهش

مواد رسوبی موجود در رودخانه‌ها را می‌توان به دو دسته تقسیم‌بندی کرد ۱- مواد رسوبی که در اثر فرسایش حوضه آبریز رودخانه وارد سیستم رودخانه-ای می‌شوند و عموماً ریزدانه هستند ۲- مواد فرسایشی که از بستر و دیواره رودخانه در اثر جریان رودخانه جدا شده و وارد مسیر جریان می‌شوند. شفاعی بجستانی (۱۳۸۷) بار رسوبی را این طور تعریف کرده است: به‌طور کلی، مواد رسوبی رودخانه که توسط جریان آب منتقل می‌شوند را بار رسوبی می‌گویند. ته-نشین شدن رسوبات، عوارضی را در محل‌های مختلف

سیواپراگاسم و همکاران (۲۰۰۷) تکنیک روش تکاملی ژنتیک را برای پیش‌بینی جریان‌های دو هفته‌ای تا ۴ برابر این دوره زمانی در طول ۱۱ سال در رودخانه پریپار به‌کار بردند. هدف از تحقیق حاضر بررسی عملکرد سیستم‌های تکاملی جهت برآورد بارکف از رودخانه قطورچای با استفاده از نمونه برداری‌های انجام شده در ایستگاه پل یزدکان می‌باشد. بدین‌منظور با استفاده از روش برنامه‌ریزی ژنتیک، ورودی‌های مورد نیاز برای مدل‌سازی، با توجه به پارامترهای حاکم روش‌های کلاسیک و همچنین مفهوم پایه‌ای به‌کار رفته در ساختار این روش‌ها، انتخاب، بهینه و تحلیل شده است.

مواد و روش‌ها

رودخانه قطورچای دارای شاخه‌های متعددی می‌باشد که سرچشمه اصلی و اولیه آن در خاک کشور ترکیه واقع گردیده است که از کوه‌های منگنه با ارتفاع ۳۵۵۰ متر سرچشمه می‌گیرند. حوضه آبریز آن ۶۶۰ کیلومتر مربع بوده و آبدهی لحظه‌ای متوسط آن ۲/۱۸ مترمکعب در ثانیه می‌باشد. قطورچای دارای آب دائمی بوده و رژیم آبی آن برفی، بارانی است. در این مطالعه جهت برآورد رسوب از داده‌های ایستگاه رسوب‌سنجی پل یزدکان واقع بر این رودخانه استفاده شده است.

رودخانه قطورچای از شاخه‌های مهم رودخانه ارس در خاک ایران می‌باشد که در استان آذربایجان غربی جریان دارد و آب‌های سطحی در محدوده شهرستان‌های خوی، ماکو و مرند را جمع‌آوری و به رودخانه مرزی ارس انتقال می‌دهد. شکل شماره ۱ تصویر ماهواره‌ای رودخانه قطورچای را نشان می‌دهد.

ظرفیت مفید آنها، کاهش عمر مفید مخزن، کاهش کیفیت آب شرب و نیز افزایش احتمال واژگونی سد.

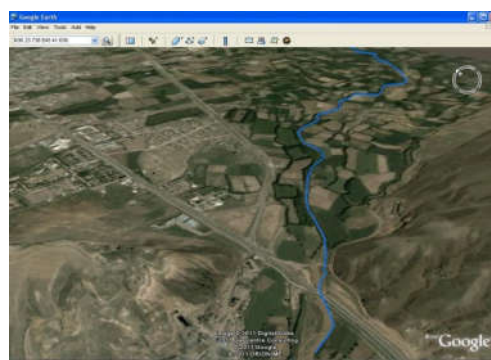
در این مطالعه عملکرد روش تکاملی برنامه‌ریزی ژنتیک جهت برآورد بار کف یک رودخانه شنی مورد ارزیابی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. الگوریتم ژنتیک روشی غیرتحلیلی و باز الهام گرفته شده از طبیعت در راستای بهینه‌سازی فرآیندها می‌باشد. فریود نام و همکاران (۱۳۸۸) پیش‌بینی جریان روزانه رودخانه لیقوان را با استفاده از سیستم‌های تکاملی ژنتیک انجام داده‌اند. نتایج به‌دست آمده نشان داد استفاده از این روش از دقت بسیار بالایی در پیش‌بینی جریان روزانه رودخانه نسبت به سایر روش‌ها برخوردار است. خو و همکاران (۲۰۰۱) رواناب ساعتی حوضه آرگوال فرانسه را با استفاده از روش تکاملی ژنتیک، پیش‌بینی نمودند.

بررسی نتایج رواناب ساعتی حوضه آرگوال نشان داد که طرح پیشنهادی، توانایی پیش‌بینی کاملاً دقیق رواناب در تمام فواصل ملاحظه شده و به‌ویژه فواصلی که کوتاه‌تر از زمان تمرکز حوضه هستند را دارد. همچنین نتایج با مطالعه انجام شده که در آن روش‌های خود همبستگی و کالمان استفاده شده، مقایسه گردید و مشخص گردید که برنامه‌ریزی ژنتیک ابزار بهتری برای پیش‌بینی می‌باشد. ویغام و کراپر (۲۰۰۱) کاربرد روش تکاملی ژنتیک در کشف رابطه بارش- رواناب برای دو حوضه مختلف گلان تیفی و بارابا را نشان دادند. لویز و وینرت (۲۰۰۴) سیستم تکاملی ژنتیک را برای مدل‌سازی سری‌های زمانی به‌کار بردند.

در مطالعات لویز و وینرت سری زمانی مختلف از جمله جریان رودخانه ریوگراند در سد فارناس در برزیل، رودخانه نیل در مصر و رودخانه تایت در ایستگاه کامبیکا در برزیل با استفاده از سیستم‌هایی بر مبنای GEP و مقادیر پیشین رواناب، مدل‌سازی شدند. نتایج نشان دادند که روش اکتشافی مطرح‌شده برای مدل‌سازی سری زمانی مناسب است.

نحوه انجام مطالعات برآورد بار کف

به‌طور کلی برآورد بارکف یک رودخانه شنی با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک و روش‌های کلاسیک در این تحقیق طی سه مرحله: ۱- جمع‌آوری اطلاعات لازم از مقدار رسوب اندازه‌گیری شده، ۲- استفاده از نرم‌افزار برای تحلیل داده‌ها و برآورد مقدار بار رسوب، ۳- مقایسه نتایج به‌دست آمده برای مقدار برآورد رسوب از طریق نرم‌افزار با مقدار برآورد از روابط تجربی انجام گرفت.



شکل ۱- تصویر ماهواره‌ای رودخانه قطورچای.

جدول ۱- مقادیر پارامترهای مورد استفاده در برآورد بار کف رودخانه با استفاده از GEP.

مقدار	پارامتر	ردیف
۷-۸	اندازه سر (Head Size)	۱
۲۵-۳۰	تعداد کروموزوم‌ها (Chromosomes)	۲
۲-۴-۵	تعداد ژن‌ها در هر کروموزوم‌ها (Number of genes)	۳
۰/۰۴۴	نرخ جهش (Mutation Rate)	۴
۰/۱	نرخ وارون‌سازی (Inversion Rate)	۵
۰/۳	نرخ دو ترکیبی تک‌نقطه‌ای (One-Point Recombination Rate)	۶
۰/۳	نرخ دو ترکیبی دو نقطه‌ای (Two-Point Recombination Rate)	۷
۰/۱	نرخ دو ترکیبی ژن (Gene Recombination Rate)	۸
۰/۱	نرخ ترانزسپوزیشن درج متوالی (IS Transposition Rate)	۹
۰/۱	نرخ ترانزسپوزیشن ریشه درج (RIS Transposition Rate)	۱۰
۰/۱	نرخ ترانزسپوزیشن ژن (Gene Transposition Rate)	۱۱
RMSE	نوع تابع خطای برازش (Fitness Function Error Type)	۱۲
جمع (+)	تابع پیوند (Linking Function)	۱۳

که در آن R محدوده انتخابی، P_{ij} مقدار پیش‌بینی شده به‌وسیله برنامه انفرادی i برای مورد برازش j (از میان n مورد برازش) و T_j مقدار هدف برای مورد برازش j است. قابل توجه است که عبارت داخل قدر مطلق متناظر با درصد خطای نسبی می‌باشد. چنانچه $P_{ij} = T_j$ باشد خطا صفر می‌شود. بنابراین برای یک برازش کامل که در آن $P_{ij} = T_j$ است عبارت داخل قدر مطلق صفر و $F_i = F_{max} = nR$ خواهد شد. نرم‌افزار مورد

یکی از موارد مهم در برنامه‌ریزی ژنتیک، تعیین تابع برازش است و هدف آن، یافتن راه‌حلی است که برای تمامی موارد برازش به اندازه یک خطای معین به‌خوبی عمل کند. از لحاظ ریاضی، برازش F_i از یک برنامه انفرادی i به صورت رابطه ۱ بیان می‌شود.

$$F_i = \sum_{j=1}^n \left(R - \left| 100 \times \frac{P_{ij} - T_j}{T_j} \right| \right) \quad [1]$$

$$F_2 = \{ +, -, \times, \div, \sin, \cos \}$$

$$F_3 = \{ +, -, \times, \div, \sin, \cos, \log \}$$

مرحله سوم، انتخاب ساختار کروموزوم‌ها است که شامل طول سر و تعداد ژن‌هاست. مرحله چهارم، انتخاب تابع پیوند است که تعیین کننده ارتباط بین زیر درخت‌هاست. مرحله پنجم، انتخاب عملگرهای ژنتیکی و نرخ آنهاست. پارامترهای مورد استفاده و نرخ آنها در مراحل مختلف استفاده از نرم‌افزار GeneXproTools 4 جهت برآورد بارکف یک رودخانه با بستر شنی با استفاده از روش GEP در جدول ۱ به‌طور خلاصه ارائه گردیده است.

همچنین روابط به‌کار گرفته شده در این تحقیق برای برآورد بارکف در جدول ۲ ارائه گردیده است.

استفاده GeneXproTools 4 بوده که نرم‌افزاری بر اساس الگوریتم‌های تکاملی برای مدل‌سازی داده‌ها است. روند برآورد بارکف رودخانه با استفاده از برنامه‌ریزی بیان ژن به‌صورت زیر می‌باشد:

مرحله نخست، شامل تعیین تابع برازش است. مرحله دوم، شامل انتخاب مجموعه ترمینال‌ها و مجموعه توابع برای ایجاد کروموزوم‌ها است. در این تحقیق نیز چهار عملگر $\{+, -, \times, \div\}$ به‌عنوان عملگرهای اصلی انتخاب شده و عملگرهای دیگری همچون روابط مثلثاتی $\{\sin, \cos\}$ و $\{\log\}$ به‌عنوان عملگرهای فرعی انتخاب شدند. بنابراین ۳ پردازش‌کننده زیر طبق رابطه ۲ مورد ارزیابی قرار گرفت:

$$F_1 = \{ +, -, \times, \div \}$$

[۲]

جدول ۲- معادلات برای برآورد بارکف رودخانه.

Nilson	$q_b = 12\theta - 0.05(\sqrt{\theta} \sqrt{(g(g_s - 1)d_s^3)})$
Casey	$q_b = 0.333S_f(q - q_c)$
Meyer-Peter and Muller	$q_b = k \sqrt{(\tau - \tau_c^3)}$

پارامترهای به‌کار رفته

$$q_b = w p i r s \sqrt{(g R s) R S / ((\frac{\gamma s}{\gamma}) - 1)}$$

$$\Theta = (\gamma R S f) / (\gamma_s - \gamma) d_s$$

$$q_c = 6.5 \times 10^6 \times D_m 0.75 / S_f 1.25$$

$$k = 12.9 / (\gamma_s \sqrt{\rho})$$

$$\Psi = D_{50} (\rho_s \times \rho) / \rho R S_0$$

$$\hat{W} = 11.2 \times (1 - 0.822 / \hat{O}_{50}) 4.5$$

$$\hat{O}_{50} = R S ((\gamma_s / \gamma) - 1) D_{50} \tau_{ci}$$

$$\tau_{ci} = 0.0875 D_{50} / D_i$$

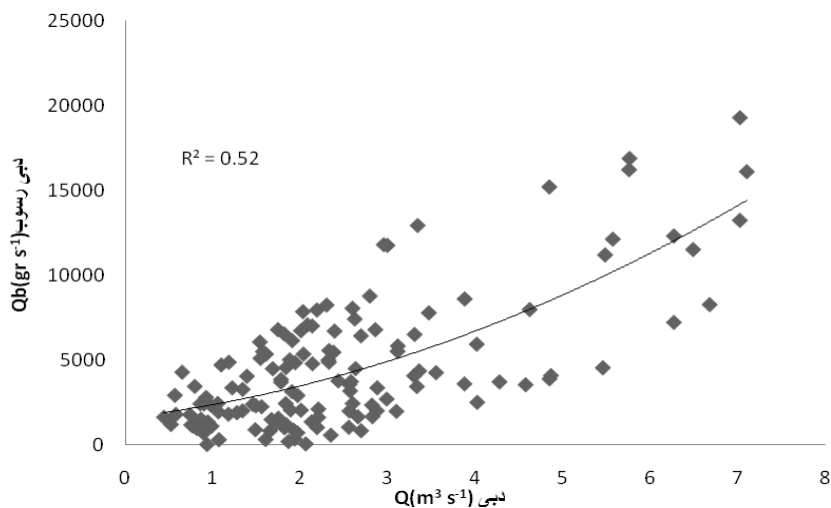
نتایج و بحث

مطابق اطلاعات و آمار اخذ شده مشخص گردید اندازه بار سطحی ذرات اندازه‌گیری شده برابر با ۰/۰۳۲۱ متر و اندازه بار زیرسطحی و بارکف ذرات اندازه‌گیری شده برابر ۰/۰۳۷ متر می‌باشد. در مرحله اول پس از ترسیم منحنی‌های سنجه مربوطه، داده‌های ناقص، تکراری و مبهم حذف گردیدند که در نهایت کل

در جدول ۲، γ عمق جریان، V سرعت متوسط جریان، S_f شیب کانل، q دبی جریان در واحد عرض، A و n : به‌ترتیب سطح مقطع جریان، ضریب مانینگ و جرم واحد حجم سیال، g و μ و D_{50} : به‌ترتیب شتاب ثقل، لزجت دینامیکی و اندازه مواد رسوبی، σ توزیع دانه-بندی کف بستر و ρ_s جرم مخصوص مواد می‌باشد.

۱۳۷ عدد کاهش یافت. در شکل ۲ نمودار منحنی سنجه داده‌ها ترسیم گردیده است.

بار رسوب کف اندازه‌گیری شده رودخانه قطورچای در ایستگاه یزدکان طی سال‌های (۱۳۷۷ تا ۱۳۸۹) به تعداد



شکل ۲- منحنی سنجه داده‌های مربوط به رودخانه قطورچای.

غیر هم‌بعد انتخاب شد که در جدول ۳ این مدل‌ها آورده شده‌اند.

به‌عنوان مدل‌های اولیه با ورودی‌های مختلف، هشت مدل برای مدل‌های هم‌بعد و هفت مدل برای مدل‌های

جدول ۳- ساخت مدل‌های مختلف هم‌بعد و غیر هم‌بعد.

مدل	ورودی‌های با بعد
Model ۱	$Q_s = f(Q, F_r, y/D_{50})$
Model ۲	$Q_s = f(y/D_{50}, Q)$
Model ۳	$Q_s = f(Q, F_r)$
Model ۴	$Q_s = f(R_c, Q)$
Model ۵	$Q_s = f(Q, R_c, y/D_{50})$
Model ۶	$Q_s = f(R_c, y/D_{50})$
Model ۷	$Q_s = f(F_r, y/D_{50})$
Model ۸	$Q_s = f(Q)$
Model ۹	$Q_s = f(F_r, y/D_{50}, S_f)$
Model ۱۰	$Q_s = f(R_c, y/D_{50}, S_f)$
Model ۱۱	$Q_s = f(Q, \tau)$
Model ۱۲	$Q_s = f(Q, \tau, y/D_{50})$
Model ۱۳	$F_{rp}, R_{cp}, S_0, W_c, C_p$
Model ۱۴	$F_r, y/b, b/D_{50}, S_0$
Model ۱۵	$F_{rp}, y/b, b/D_{50}, S_0$

D_{50} ، g شتاب ثقل زمین، V سرعت جریان، T عرض

بستر، τ تنش برشی بستر، ρ جرم مخصوص آب، μ

که در آن Q_s بار کف، Q دبی جریان، S_0 شیب بستر، S_f

شیب خط انرژی، Y عمق جریان، اندازه متوسط ذرات

$$DC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{ci})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{om})^2} \quad [4]$$

که در آن Q_{oi} ، Q_{ci} ، Q_{om} به ترتیب میانگین خروجی مشاهداتی، خروجی محاسباتی و خروجی مشاهداتی می‌باشد.

لازم به توضیح است که برای هر دو حالت بار-سطحی ($D50=0/00321$) و بار زیرسطحی ($D50=0/0037$) محاسبات لازم انجام گرفته است.

همچنین به منظور ارزیابی و بررسی کارایی روش استفاده شده برای برآورد بار کف رودخانه شنی در این تحقیق از معیارهای جذر میانگین مربعات خطاها ($RMSE$) رابطه ۵ و ضریب همبستگی (R) رابطه ۶ استفاده شده است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad [5]$$

که در آن y_i مقدار واقعی متغیر وابسته و \hat{y}_i مقدار پیش‌بینی شده آن و n تعداد مشاهدات می‌باشد. هرچه این آمار کمتر باشد نشان‌دهنده عملکرد بهتر مدل است. مطابق با رابطه ۵ معیار $RMSE$ دارای واحد می‌باشد اما به دلیل آنکه در این تحقیق داده‌ها به صورت نرمالیزه شده به کار رفته‌اند $RMSE$ بدون واحد خواهد بود.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^m (y_m - \bar{Y}_m)(y_p - \bar{Y}_p)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (y_m - \bar{Y}_m)^2 (y_p - \bar{Y}_p)^2}} \quad [6]$$

با محاسبه هر یک از معیارهای ارزیابی (DC ، R) برای روابط کلاسیک نتایج به دست آمده در جدول ۴ خلاصه گردیده است. بارسطحی ذرات اندازه‌گیری شده $0/0321$ متر و اندازه بار زیرسطحی و بار کف ذرات اندازه‌گیری شده $0/037$ متر می‌باشد.

لزجت دینامیکی آب، Fr عدد فروید، Re عدد رینولدز، R شعاع هیدرولیکی، p پیرامون مرطوب، $\frac{v}{k}$ تنش برشی بی‌بعد و u سرعت برشی می‌باشد.

برای دستیابی به نتایج بهتر و دقیق، روند آموزش چند بار تکرار گردید که نهایتاً الگوی ۲۷٪ داده‌ها جهت آزمون و ۷۳٪ داده‌ها جهت آموزش به‌عنوان الگوی برتر انتخاب شد. آموزش نرم‌افزار GeneXproTools در صورت اعمال یک‌سری پیش‌پردازش‌ها بر روی ورودی‌ها و هدف، می‌تواند کارایی بالاتری داشته باشد. با در نظر گرفتن ۲۷٪ کل داده‌ها برای آزمون ۳۷ داده به آزمون و در نظر گرفتن ۷۳٪ داده‌ها برای آموزش ۱۰۰ داده برای آموزش اختصاص داده شده است. چنان‌که پس از مشخص شدن پارامترهای هر یک از مدل‌ها نرمال‌سازی برای تمامی آن‌ها اعمال گردیده است. در این تحقیق برای نرمال‌سازی از پیش‌پردازش رابطه ۳ استفاده شده است که در آن منظور از x_{imin} کمترین داده و x_{imax} بیشترین داده از نظر مقدار است.

$$X_{istd} = 0.05 + 0.95 \times \frac{(x_i - x_{i \min})}{(x_{i \max} - x_{i \min})} \quad [3]$$

برای برآورد مقدار بار رسوب کف رودخانه قطورچای از روی روابط کلاسیک (تجربی) به کار رفته، محاسبات لازم انجام گردیده است. همچنین برای تحلیل بهتر نتایج استخراجی از روی روابط کلاسیک ابتدا بر روی داده-های اندازه‌گیری شده و همچنین نتایج به دست آمده از روی روابط (برای ۱۳۷ داده) نرمال‌سازی (پیش-پردازش) در دامنه (۱ و $0/05$) مطابق رابطه ذکر شده انجام شد. پس از این مرحله مطابق رابطه به‌کاربرده شده (رابطه ۳) مقدار DC از رابطه ۴ محاسبه شد.

جدول ۴- نتایج استخراجی از روابط کلاسیک.

رابطه	R	DC
نیلسون	۰/۶۹	۰/۶۲
	۰/۱۰	۰/۶۹
کیسی	۰/۶۹	۰/۶۷
	۰/۶۹	۰/۵۷
میر - پیتر	-	-
	۰/۶۹	۰/۴۸
پارکر	-	-
	۰/۳۰	۰/۲۰
اینشتین	۰/۳۷	۰/۱۰
	۰/۱۴	۰/۱۰

مربوط به برنامه‌ریزی ژنتیک برای ۱۵ مدل تعریف شده در جدول ۵ آورده شده است.

نتایج استخراجی حاصل از معیارهای ارزیابی (DC) و $RMSE$ (که از خود نرم‌افزار به دست می‌آید) در جدول ۵ آورده شده است.

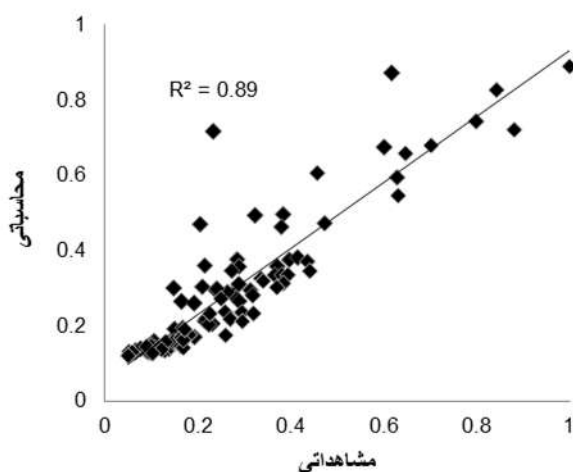
جدول ۵- نتایج استخراجی از برنامه‌ریزی ژنتیک برای مدل‌ها.

مدل	آموزش			آزمون		
	DC	R	RMSE	DC	R	RMSE
۱) $Q_s=f(Q, F_r, y/D_{50})$	۰/۷۲	۰/۸۹	۰/۱۰	۰/۵۸	۰/۸۹	۰/۱۲
۲) $Q_s=f(y/D_{50}, Q)$	۰/۳۰	۰/۷۴	۰/۱۶	۰/۱۰	۰/۶۸	۰/۱۷
۳) $Q_s=f(Q, F_r)$	۰/۷۳	۰/۸۸	۰/۱۰	۰/۵۷	۰/۸۹	۰/۱۲
۴) $Q_s=f(R_e, Q)$	۰/۸۵	۰/۹۴	۰/۰۷	۰/۸۱	۰/۹۶	۰/۰۷
۵) $Q_s=f(Q, R_e, y/D_{50})$	۰/۸۵	۰/۹۳	۰/۰۷	۰/۸۰	۰/۹۳	۰/۰۷
۶) $Q_s=f(R_e, y/D_{50})$	۰/۸۷	۰/۹۴	۰/۰۷	۰/۸۳	۰/۹۷	۰/۰۵
۷) $Q_s=f(F_r, y/D_{50})$	۰/۷۳	۰/۹۰	۰/۱۰	۰/۵۸	۰/۸۹	۰/۱۱
۸) $Q_s=f(Q)$	۰/۵۶	۰/۷۵	۰/۱۳	۰/۴۳	۰/۶۷	۰/۱۳
۹) $Q_s=f(F_r, y/D_{50}, S_f)$	۰/۵۵	۰/۷۵	۰/۱۳	۰/۴۲	۰/۶۶	۰/۱۴
۱۰) $Q_s=f(R_e, y/D_{50}, S_f)$	۰/۵۷	۰/۷۶	۰/۱۳	۰/۴۱	۰/۶۶	۰/۱۴
۱۱) $Q_s=f(Q, \tau)$	۰/۶۰	۰/۷۸	۰/۱۲	۰/۵۰	۰/۷۲	۰/۱۳
۱۲) $Q_s=f(Q, \tau, y/D_{50})$	۰/۶۳	۰/۷۹	۰/۱۲	۰/۵۰	۰/۷۲	۰/۱۳
۱۳) $Q_s=f(U, R, \tau)$	۰/۵۵	۰/۷۴	۰/۱۳	۰/۴۳	۰/۶۶	۰/۱۳
۱۴) $Q_s=f(Q, \tau, y/D_{50})$	۰/۶۰	۰/۷۰	۰/۱۳	۰/۴۰	۰/۷۰	۰/۱۴
۱۵) $Q_s=f(Q, \tau, S_f)$	۰/۵۶	۰/۷۵	۰/۱۳	۰/۴۲	۰/۶۷	۰/۱۴

مدل‌ها دارای بهترین نتایج می‌باشد. چنان‌که مقادیر به دست آمده برای DC و R و همچنین $RMSE$ این مدل هم

همان‌طور که از نتایج مربوط به جدول فوق استنباط می‌گردد مدل شماره ۶ با توابع $(R_e, Y/D_{50})$ در بین بقیه

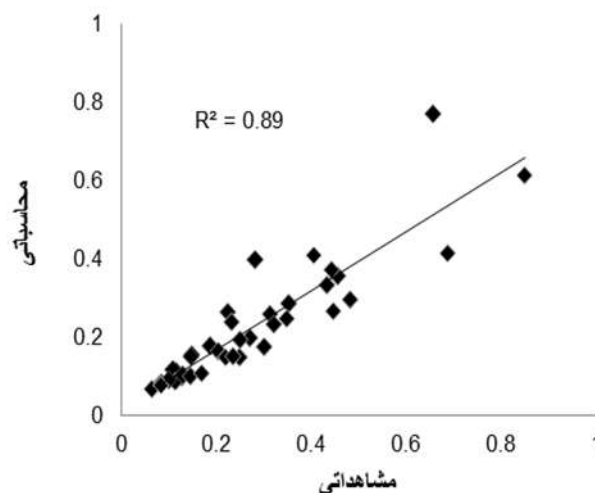
لزجت دینامیکی آب و سرعت متوسط پارامترهای مهم تعیین یا برآورد بارکف رودخانه با بستر شنی می‌باشند. در شکل‌های شماره ۳ و ۴ نمودار پراکنندگی داده‌های مشاهداتی و محاسباتی به‌ترتیب برای مرحله آموزش و مرحله آزمون ساختار بهینه یا همان بهترین مدل (مدل ۶) آورده شده است.



شکل ۴- نمودار پراکنندگی داده‌های مشاهداتی و محاسباتی برای مرحله آموزش.

رابطه نیلسون به‌ترتیب از نظر قابلیت پیش‌بینی رسوب بارکف در این ایستگاه رتبه‌بندی می‌شوند. جدول ۶ نتایج مقایسه‌ای را در حالت کلی مشخص می‌کند.

برای مرحله آموزش و هم برای مرحله آزمون در مقایسه با بقیه مدل‌های دیگر دارای بهترین نتایج است. یعنی اینکه اهمیت و تأثیر پارامترهای Re ، y/D_{50} و همچنین Q در برآورد بارکف رودخانه مورد نظر از بقیه پارامترها خیلی بیشتر می‌باشد. پس دانه‌بندی مواد (اندازه متوسط ذرات، عمق، دبی جریان و پارامتر بدون بعد Re که خود تابعی است از جرم مخصوص آب،

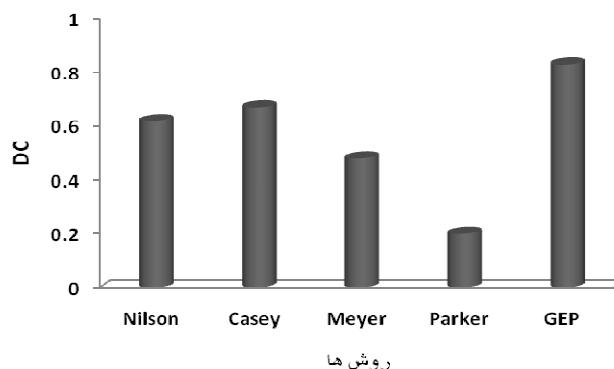


شکل ۳- نمودار پراکنندگی داده‌های مشاهداتی و محاسباتی برای مرحله آزمون.

از نتایج بدست آمده از روش برنامه‌ریزی ژنتیک جدول ۵ و همچنین نتایج حاصله از روابط تجربی جدول ۴ مشخص می‌گردد که رابطه کیسی و پس از آن

جدول ۶- مقایسه نتایج معادلات تجربی و برنامه‌ریزی ژنتیک در برآورد بار رسوب کف برای مرحله آزمون.

روش	نیلسون	کیسی	میر - پیتر	پارکر	GEP
DC	۰/۶۲	۰/۶۷	۰/۴۸	۰/۲۰	۰/۸۳
R	۰/۶۹	۰/۶۹	۰/۶۹	۰/۳۰	۰/۹۷



شکل ۵ - نمودار نتایج مقایسه‌ای عملکردها.

- روش برنامه‌ریزی ژنتیک عملکرد بهتری در پیش‌بینی بار کف رودخانه مورد نظر نسبت به دیگر روش‌های کلاسیک از خود نشان داد. همچنین استفاده از بازه (۰/۰۵ تا ۱) برای نرمال‌سازی و پیش‌پردازش داده‌ها نتایج مطلوب‌تری به همراه داشته است.

- در روش برنامه‌ریزی ژنتیک (GEP) هم نوع مدل‌های ورودی و هم تحلیل حساسیت تأثیر بالایی در دقت جواب‌های خروجی از خود نشان داد.

- مدل برتر (GEP) دارای ورودی‌های Re و Y/D_{50} با $DC=0.83$ و $R=0.97$ و $RMSE=0.05$ برای مرحله آزمون می‌باشد. همچنین برنامه‌ریزی ژنتیک رابطه‌ی مورد استفاده برای پیش‌بینی را به صورت مدل ریاضی نشان داده است.

- پس از مدل‌های مربوط به روش (GEP)، روش‌های منحنی‌سنجه، روش کیسی، روش نیلسون، به ترتیب از نظر قابلیت پیش‌بینی رسوب بارکف در این ایستگاه رتبه‌بندی می‌شوند.

همچنین در شکل ۵ نمودار نتایج عملکرد روش برنامه‌ریزی ژنتیک در مقایسه با روابط تجربی برای مرحله آزمون نشان داده شده است.

نتیجه‌گیری کلی

در این مطالعه عملکرد روش برنامه‌ریزی ژنتیک در پیش‌بینی بار رسوب کف رودخانه قطورچای ارزیابی گردید. برای مقایسه، چند روش کلاسیک با توجه به مفهوم پایه‌ای به کار رفته در ساختارشان، انتخاب شد و با مدل‌های پیش‌بینی کننده بار رسوب مورد مقایسه قرار گرفتند. در مدل‌سازی برنامه‌ریزی ژنتیک حالات بهینه عواملی چون محدوده نرمال‌سازی داده‌ها، تعداد ژن، تعداد کروموزوم، طول سر برای رسیدن به کارایی بهتر مورد بررسی قرار گرفتند. در نهایت بهترین ساختار برای روش برنامه‌ریزی ژنتیک انتخاب شد. در طی این مراحل نتایجی به دست آمده است که به شرح زیر می‌باشد:

منابع مورد استفاده

شفاعی بجستان م، ۱۳۸۷. مبانی نظری و عملی هیدرولیک انتقال رسوب. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز چاپ اول.

فربودنام ن، قربانی مع، اعلمی مت، ۱۳۸۸. پیش‌بینی جریان رودخانه با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک (مطالعه موردی: حوضه آبریز رودخانه لیقوان). مجله دانش کشاورزی، جلد ۱۹، شماره ۱، صفحه‌های ۱۰۷ تا ۱۲۳.

Khu ST, Liong SY, Babovic V, Madsen H and Muttill N, 2001. Genetic programming and its application in real-time runoff forming. *Journal of American Water Resources Association* 37(2): 439-451.

Whigham PA, Crapper PF, 2001. Modeling rainfall-runoff using Genetic Programming. *Mathematical and Computer Modeling* 33: 707-721.

Lopes HS, Weinert WR, 2004. EGIPSYS: An enhanced gene expression programming approach for symbolic regression problems. *Applied Mathematics and Computer Science* 14(3): 375-384.

Sivapragasam C, Vasudeven G, Vincent P, 2007. Genetic programming model for forecast of short and noisy data. *Hydrological Process* 21: 266-272.

Ferreira C, 2001. Gene expression programming: A new adaptive algorithm for solving problems. *Complex Systems* 13(2): 87-129.